纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能、血清免疫和生化指标的影响

王　彬[1]　刘路杰[1]　祝　佳[1]　邹君彪[2]　冷董碧[2]　王敏奇[1*]

（1.浙江大学动物科学学院，杭州 310058；2.江西兴鼎科技有限公司，南昌 330115）

摘　要：本试验旨在研究饲粮添加不同剂量的纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能、血清免疫和生化指标的影响。试验选用 28 日龄体重（9.37±0.48） kg“杜×长×大”三元杂交断奶仔猪 150 头，随机分为 5 组，每组 3 个重复，每个重复 10 头猪。对照组饲喂基础饲粮；试验 1、2、3 组在基础饲粮中分别添加 150、300 和 450 mg/kg 的纳米氧化锌；高锌组在基础饲粮中添加 3 000 mg/kg 的普通氧化锌。试验期为 21 d。结果表明：1）与对照组相比，饲粮添加纳米氧化锌显著提高了仔猪的平均日采食量和平均日增重（P<0.05），显著降低了料重比和腹泻率（P<0.05），其中以 300 和 450 mg/kg 剂量组的作用效果较佳，且与普通氧化锌效果相当；2）与对照组相比，饲粮中添加纳米氧化锌能显著提高血清中免疫球蛋白 A、白细胞介素–6 和肿瘤坏死因子 α 含量（P<0.05），显著降低血清尿素氮含量（P<0.05）。由此可见，饲粮中添加 300 或 450 mg/kg 的纳米氧化锌能提高断奶仔猪的免疫机能，改善生长性能，降低腹泻率，具有替代普通氧化锌的潜在应用价值。

关键词：纳米氧化锌；断奶仔猪；生长性能；细胞因子；免疫指标；血清生化指标

中图分类号：S816.7　　文献标识码：　　文章编号：

锌是一种动物必需的矿物元素，其在体内的含量较少，但对机体生长发育、免疫功能和肠道健康等方面发挥巨大的调节作用[1-2]。仔猪早期隔离断奶是规模化猪场提高母猪利用率的重要手段之一，但由此产生的仔猪早期断奶应激会导致断奶仔猪采食量下降，生长迟滞，腹泻率上升，生产性能大幅下降[3]。许多研究已证实，饲粮中添加高剂量的氧化锌不仅可以降低断奶仔猪的腹泻率，还可以缓解仔猪早期断奶应激，提高生产性能[4-6]。所以高剂量氧化锌已被广泛应用于治疗和预防断奶仔猪腹泻，但是其较低的吸收效率及粪便中高排出量的问题日益凸现，这不仅会造成严重的资源浪费，还会导致环境污染[7]。因此研究高吸收率的新型锌源逐渐成为当前动物营养界的热点。纳米技术的发展，为寻找新型锌源提供了新思路。纳米氧化锌是目前最为成熟的和商业化应用最早的纳米材料之一。纳米氧化锌作为一种新型锌源，具有粒径小、比表面积大和生物利用率高等优良特性[8-9]。目前，纳米氧化锌的制备

收稿日期：2016－05－26

作者简介：王　彬（1991－），男，安徽安庆人，硕士研究生，从事纳米微量元素添加剂的研究。E-mail: wangbin0524@foxmail.com

*通信作者：王敏奇，教授，博士生导师，E-mail: wangmq@zju.edu.cn

方法有多种，主要可分为物理方法和化学方法，具体的方法有固相反应法、气相反应法、直接沉淀法、沉淀转化法、溶胶–凝胶法和微乳液法等。不同方法制备的纳米氧化锌在性能和生产成本上具有一定的差异。本课题组前期以乙酸锌和乙醇为原料，在溶剂热条件下乙酸锌和乙醇发生醇解反应，使氧化锌的生成与乙酸根和乙醇的酯化反应相耦合，制备出了兼备水分散性和油分散性、无团聚的纳米氧化锌颗粒。现本试验通过与普通氧化锌对比，考察纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能、血清免疫和生化指标的影响，旨在探究纳米氧化锌替代普通氧化锌的潜在可能性，为其在断奶仔猪上的应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

普通氧化锌（市购，饲料级）；纳米氧化锌由江西兴鼎科技有限公司提供，平均粒径为71.61 nm，聚合物分散指数（PDI）为0.097，Zeta电位为 + 31.1 mV，比表面积为21.041 m^2/g。

1.2　试验设计

试验选取150头28日龄平均体重（9.37±0.48） kg“杜×长×大”三元断奶仔猪，随机分为5组，每组3个重复，每个重复10头猪（公母各占1/2）。试验期为21 d。5组试验猪分别饲喂基础饲粮（对照组，含锌100 mg/kg）以及在基础饲粮中分别添加150、300、450 mg/kg纳米氧化锌和3 000 mg/kg普通氧化锌的饲粮。基础饲粮参照NRC(2012)断奶仔猪营养需要配制成粉状全价料，基础饲粮组成及营养水平见表1。

表1　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　　　　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米 Corn	56.00
豆粕 Soybean meal	29.40
鱼粉 Fish meal	5.50
乳清 Whey powder	4.50
大豆油 Soybean oil	1.50
碳酸钙 $CaCO_3$	0.50
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.15
氯化钠 NaCl	0.30

赖氨酸 Lys	0.10
蛋氨酸 Met	0.05
预混料 Premix[1)]	1.00
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]	
消化能 DE/(MJ/kg)	14.40
粗蛋白质 CP	21.53
赖氨酸 Lys	1.46
蛋氨酸 Met	0.38
钙 Ca	0.91
总磷 TP	0.73

1)预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of the diet：VA 6 200 IU,VD_3 700 IU,VE 88 IU,VK 4.4 mg,VB_2 8.8 mg,泛酸 pantothenate 24.2 mg,烟酸 nicotinic acid 33 mg,氯化胆碱 chloride choline 330 mg,Cu 10 mg, Zn 100 mg, Fe 145 mg,Mn 40 mg, Se 0.1mg,I 0.3 mg。

2)消化能为计算值，其他为实测值。DE was a calculated value, while the others were measured values.

1.3 饲养管理

试验仔猪采用分栏群饲，自由采食和饮水，进行常规仔猪免疫程序，饲养管理按常规进行。试验前对猪舍常规进行消毒。预试期 7 d，正试期 21 d。试验期间每天记录饲料消耗量及腹泻状况。试验结束后，禁饲 24 h 后称重。计算平均日采食量(ADFI)、平均日增重(ADG)和料重比(F/G)及腹泻率。

腹泻率（%）=100×（腹泻仔猪头数×仔猪腹泻天数）/（试验仔猪头数×正试天数）。

1.4 样品采集与保存

饲养试验结束后，从各组中选取体重接近的试验猪各 6 头（公母各占 1/2），共 30 头。试验结束当天 08：00，对 30 头试验猪进行前腔静脉采血，3 000 r/min 离心 15 min，吸取上层血清到 Eppendorf 管中，置于－70 ℃保存。采血前 1 天 20：00 停喂饲粮，使仔猪空腹 12 h。

1.5 指标测定及方法

1.5.1 免疫指标测定

血清中免疫球蛋白 G(IgG)、免疫球蛋白 M(IgM)、免疫球蛋白 A(IgA)、补体 3(C3)和补体 4(C4)含量的测定采用免疫浊度法，试剂盒购于南京建成生物工程研究所，采用 OLYMPUS

AU400 全自动生化分析仪测定。

1.5.2 血清细胞因子

血清白细胞介素–6(IL-6)、肿瘤坏死因子－α(TNF-α)含量的测定采用酶联免疫吸附测定（ELISA）法测定，ELISA 试剂盒购于上海研卉生物科技有限公司。

1.5.3 血清生化指标

血清中总蛋白(TP)、葡萄糖(GLU)、尿素氮(UN)、总胆固醇(TCHO)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白（HDL）、钙(Ca)、磷(P)含量及谷丙转氨酶(GPT)、谷草转氨酶(GOT)、碱性磷酸酶(AKP)活性采用 OLYMPUS AU400 全自动生化分析仪测定，试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.6 数据处理与分析

所有试验数据以平均值±标准差表示，采用 SPSS 20.0 统计软件对数据进行单因素方差分析（one-way ANOVA），采用 Duncan 氏多重比较进行组间差异显著性检验，P＜0.05 为差异显著，P>0.05 为差异不显著。

2 结果与分析

2.1 生长性能与腹泻率

从表 2 可以看出，与对照组相比，饲粮中添加 300 和 450 mg/kg 的纳米氧化锌可以显著提高断奶仔猪的 ADG 和 ADFI（P<0.05），显著降低 F/G（P<0.05）；150 mg/kg 的纳米氧化锌可以显著提高断奶仔猪的 ADG 和 ADFI（P<0.05），但对 F/G 没有显著性影响（P>0.05）；3 000 mg/kg 的普通氧化锌可以显著提高断奶仔猪的 ADG 和 ADFI（P<0.05），显著降低 F/G（P<0.05），与 300 和 450 mg/kg 的纳米氧化锌作用效果相当。

断奶仔猪饲粮中添加不同剂量的纳米氧化锌具有不同程度的抗腹泻效果，其中以 300 和 450 mg/kg 剂量较佳。与对照组相比，150、300 和 450 mg/kg 纳米氧化锌组仔猪腹泻率分别下降了 28.95%（P>0.05）、57.24%（P<0.05）和 79.14%（P<0.05），3 000 mg/kg 普通氧化锌组仔猪腹泻率下降了 58.09%（P<0.05）。

表 2 纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能和腹泻率的影响

Table 2 Effects of zinc oxide nanoparticles on growth performance and diarrhea rate of weaned piglets

项目 Items	对照 Control	普通氧化锌 Common zinc oxide （3 000 mg/kg）	纳米氧化锌 Zinc oxide nanoparticles/(mg/kg)		
			150	300	450
初重 Initial weight/kg	9.57±0.57	9.35±0.61	9.43±0.27	9.28±0.31	9.27±0.80
末重 Final weight/kg	15.69±0.72^{a}	16.78±0.45^{b}	17.06±0.58^{b}	17.40±0.71^{b}	17.13±0.30^{b}

平均日增重 ADG/g	286.38±28.59^{a}	353.96±17.25^{b}	358.24±21.56^{b}	386.95±15.09^{b}	374.44±18.99^{b}
平均日采食量 ADFI/g	605.59±21.89^{a}	687.30±21.60^{bc}	727.34±28.31^{c}	707.94±24.73^{bc}	676.03±20.21^{b}
料重比 F/G	2.17±0.06^{a}	1.95±0.04^{bc}	2.03±0.13^{ab}	1.83±0.08^{c}	1.80±0.08^{c}
腹泻率 Diarrhea rate/%	15.20±2.51^{a}	6.37±3.55^{bc}	10.80±4.25^{ab}	6.50±1.40^{bc}	3.17±2.78^{c}

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著（P>0.05），不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (P>0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference （P<0.05）. The same as below.

2.2 血清免疫指标

从表 3 可以看出，饲粮中添加不同剂量的纳米氧化锌对断奶仔猪免疫性能有不同程度的影响。与对照组相比，150、300 和 450 mg/kg 纳米氧化锌组血清 IgA 含量分别提高了 16.67%（P>0.05）、28.43%（P<0.05）和 32.35%（P<0.05），3 000 mg/kg 普通氧化锌组血清 IgA 含量提高了 20.59%（P<0.05）；饲粮中添加不同剂量的纳米氧化锌和 3 000 mg/kg 普通氧化锌能显著降低血清 IgM 含量（P<0.05），但对血清中 C3、C4 和 IgG 的含量没有显著性影响（P>0.05）。

表 3 纳米氧化锌对断奶仔猪血清免疫指标的影响

Table 3 Effects of zinc oxide nanoparticles on serum immune indices of weaned piglets g/L

项目 Items	对照 Control	普通氧化锌 Common zinc oxide （3 000 mg/kg）	纳米氧化锌 Zinc oxide nanoparticles/(mg/kg)		
			150	300	450
免疫球蛋白A IgA	1.02±0.14^{a}	1.23±0.14^{b}	1.19±0.17^{ab}	1.31±0.12^{b}	1.35±0.11^{b}
免疫球蛋白G IgG	2.58±0.24	2.35±0.22	2.67±0.26	2.47±0.22	2.39±0.29
免疫球蛋白M IgM	0.71±0.13^{a}	0.56±0.09^{b}	0.54±0.12^{b}	0.50±0.09^{b}	0.50±0.07^{b}
补体 3 C3	0.033±0.012	0.045±0.021	0.038±0.020	0.033±0.019	0.034±0.015

补体 4 C4	0.043±0.005	0.045±0.010	0.037±0.012	0.033±0.010	0.034±0.005

2.3　血清细胞因子含量

从表 4 可以看出，饲粮中添加不同剂量的纳米氧化锌对断奶仔猪血清 IL-6 和 TNF-α 含量有不同程度的影响。与对照组相比，150、300 和 450 mg/kg 纳米氧化锌组血清 IL-6 含量分别提高了 9.72%（P<0.05）、11.95%（P<0.05）和 18.27%（P<0.05），3 000 mg/kg 普通氧化锌组血清 IL-6 含量提高了 22.47%（P<0.05）；饲粮中添加不同剂量的纳米氧化锌和 3 000 mg/kg 普通氧化锌可以显著提高血清中 TNF-α 含量（P<0.05），150、300、450 mg/kg 纳米氧化锌组和 3 000 mg/kg 普通氧化锌组血清 TNF-α 含量分别提高了 27.47%、29.41%、32.35%和 36.43%。

表 4　纳米氧化锌对断奶仔猪血清细胞因子含量的影响

Table 4　Effects of zinc oxide nanoparticles on serum cytokine contents of weaned piglets　　ng/L

项目 Items	对照 Control	普通氧化锌 Common zinc oxide （3 000 mg/kg）	纳米氧化锌 Zinc oxide nanoparticles/(mg/kg)		
			150	300	450
白细胞介素－6 IL-6	58.08±2.98[a]	71.13±2.48[d]	63.73±4.17[b]	65.02±4.57[bc]	68.69±4.15[cd]
肿瘤坏死因子－α TNF-α	229.24±21.85[a]	312.76±22.54[b]	292.22±19.93[b]	296.65±22.84[b]	303.39±15.44[b]

2.4　血清生化指标

从表 5 可以看出，与对照组相比，饲粮中添加纳米氧化锌显著提高了血清中 AKP 活性（P<0.05），显著降低了血清中 GOT 活性和 UN 含量（P<0.05）。150、300 和 450 mg/kg 纳米氧化锌组血清 GPT 活性分别较对照组提高了 8.03%（P>0.05）、15.68%（P>0.05）和 18.34%（P<0.05），AKP 活性分别较对照组提高了 55.29%（P<0.05）、92.55%（P<0.05）和 80.74%（P<0.05）。150、300 和 450 mg/kg 纳米氧化锌组血清 GOT 活性分别较对照组降低了 36.87%（P<0.05）、24.59%（P<0.05）和 14.19%（P<0.05），UN 含量分别较对照组降低了 23.53%（P<0.05）、39.80%（P<0.05）和 24.31%（P<0.05）。3 000 mg/kg 普通氧化锌组血清 GPT 和 AKP 活性分别较对照组提高了 31.36%（P<0.05）和 62.30%（P<0.05），GOT 活性和 UN 含量分别较对照组降低了 13.14%（P>0.05）和 23.92%（P<0.05）。各组间血清中 TP、TCHO、TG、HDL、GLU、Ca 和 P 含量未发现有显著性差异（P>0.05）。

表 5　纳米氧化锌对断奶仔猪血清生化指标的影响

Table 5　Effects of zinc oxide nanoparticles on serum biochemical indices of weaned piglets

项目 Items	对照 Control	普通氧化锌 Common zinc oxide （3 000 mg/kg）	纳米氧化锌 Zinc oxide nanoparticles/(mg/kg)		
			150	300	450
总蛋白 TP/(g/L)	52.25±2.95	51.68±3.56	51.32±2.33	49.45±2.60	48.60±1.94
谷丙转氨酶 GPT/(U/L)	47.83±4.71[a]	62.83±6.24[c]	51.67±4.84[ab]	55.33±9.63[abc]	56.60±5.41[bc]
谷草转氨酶 GOT/(U/L)	59.67±6.41[a]	51.83±6.21[ac]	37.67±2.16[b]	45.00±8.22[bc]	51.20±7.98[c]
碱性磷酸酶 AKP/(U/L)	149.83±7.47[a]	243.17±12.16[b]	232.67±18.04[b]	288.50±20.71[c]	270.80±10.33[c]
尿素氮 UN/(mmol/L)	5.10±0.82[a]	3.88±0.63[b]	3.90±0.55[b]	3.07±0.34[c]	3.86±0.56[b]
总胆固醇 TCHO/(mmol/L)	1.84±0.29	1.95±0.47	1.79±0.36	1.90±0.25	1.88±0.51
甘油三酯 TG/(mmol/L)	0.43±0.15	0.46±0.12	0.46±0.37	0.37±0.05	0.38±0.16
高密度脂蛋白 HDL/(mmol/L)	0.56±0.12	0.58±0.12	0.65±0.20	0.65±0.11	0.62±0.26
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	3.51±0.26	3.98±0.48	3.67±0.63	4.05±0.24	4.04±0.35
钙 Ca/(mmol/L)	2.14±0.07	2.21±0.15	2.19±0.18	2.28±0.06	2.15±0.08
磷 P/(mmol/L)	2.81±0.33	3.06±0.19	2.71±0.28	3.04±0.31	2.78±0.20

3　讨　论

3.1　纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能和腹泻率的影响

本试验结果表明，饲粮中添加纳米氧化锌可以提高断奶仔猪的 ADG 和 ADFI，降低 F/G，其中以 300 和 450 mg/kg 纳米氧化锌组作用效果较显著，与 3 000 mg/kg 普通氧化锌组作用效果相当，具有替代普通氧化锌的潜力。这与大多数的研究结果一致。胡彩虹等[10]研究发现，

断奶仔猪饲粮中添加 300 mg/kg 纳米氧化锌组 ADG 比对照组显著提高 7.26%，其效果与 3 000 mg/kg 高锌组相当。方洛云等[11]研究发现，在仔猪饲粮中添加 300 mg/kg 纳米氧化锌能显著提高仔猪的 ADG，显著降低 F/G，具有替代高锌饲粮（3 000 mg/kg 氧化锌）的潜力。冯占雨等[12]试验表明，添加 3 000 mg/kg 氧化锌和 600 mg/kg 纳米氧化锌时，仔猪腹泻率显著低于未添加组，分别为 5.4%、2.4%和 48.9%。低剂量的纳米氧化锌对断奶仔猪的促生长效果与高剂量的普通氧化锌相当，其原因一方面可能是纳米氧化锌粒径小，能增加微粒与肠壁的接触面积，延长接触时间，大大提高了吸收效率[10]；另一方面可能是因为锌是味觉素的组成成分，而味觉素对口腔中黏膜上皮细胞的结构、功能和代谢有重要作用，进而会影响舌乳头中味蕾小孔的形态和功能，增强味蕾对味觉的敏感性，从而可以通过提高食欲来增加采食量[13]。

本试验结果表明，饲粮中添加 300 和 450 mg/kg 纳米氧化锌具有良好的抗腹泻效果，与 3 000 mg/kg 普通氧化锌相当。其可能原因主要有：1）纳米氧化锌比表面积大，分子间键态失配，对断奶仔猪肠道病原微生物具有较强的抑制能力[14]；2）纳米氧化锌与生物膜的黏着性提高，延长了与肠黏膜的作用时间，可以比普通氧化锌更有效地增强肠上皮细胞间紧密连接蛋白的表达，降低肠道通透性，保护肠屏障；3）纳米氧化锌具有较高的生物活性，可以与许多有机物发生氧化还原反应，从而与饲粮中的抗原物质发生反应，降低断奶仔猪的过敏反应，减少腹泻的发生。

3.2　纳米氧化锌对断奶仔猪血清免疫指标的影响

免疫球蛋白是畜禽体内重要的免疫功能蛋白，主要有 IgG、IgA 和 IgM 3 种。在正常状况下，血清中 IgG、IgA 和 IgM 的含量与畜禽免疫力是成正相关的。IgG 是血液免疫球蛋白中含量最高的一种，约占 85%，在抗体介导的体液免疫中占主要地位。IgA 可以分为血清型 IgA 和分泌型 IgA，其中血清型 IgA 占总 IgA 的 85%左右，可调控吞噬作用。IgM 是主要的初次免疫抗体，其在动物体内含量次于 IgA。补体 C3 和 C4 具有协助、补充和加强抗体及吞噬细胞免疫活性的作用，在机体防御体系中起到协同抗感染的作用。本试验发现断奶仔猪饲粮中添加纳米氧化锌能显著提高血清 IgA 含量，增强机体免疫力，但对 IgM 具有降低作用，具体原因需进一步研究。方洛云等[15]研究发现，仔猪饲粮中添加 300 mg/kg 纳米氧化锌和 3 000 mg/kg 普通氧化锌能够提高血清 IgA 含量，但对血清 IgG 和 IgM 含量没有显著性影响。然而喻兵权等[13]研究发现，断奶仔猪饲粮中添加不同剂量的纳米氧化锌能提高断奶仔猪血清 IgG 含量，并推断纳米氧化锌抗腹泻和促生长作用与其能提高仔猪 IgG 水平有关。试验结果出现这种不一致的主要原因可能是：1）试验动物本身的免疫性能存在差异；2）本课

题制备的新型纳米氧化锌与其他试验使用的锌源具有差异性。

3.3　纳米氧化锌对断奶仔猪血清细胞因子含量的影响

细胞因子是由免疫细胞或者某些组织细胞分泌的一类具有免疫调节功能的小分子蛋白，其可以特异性地结合细胞受体，促进免疫细胞的增殖和分化，增强机体的抗感染能力，促进或者抑制其他细胞因子的分泌，进而调控机体的免疫功能。但是，这些细胞因子的过度分泌也会对机体产生负面影响，如降低营养物质的利用效率[16]。所以畜禽体内的血清细胞因子含量在一定程度上反映了机体的免疫机能和健康状况。IL-6 是由多种细胞产生的一种多功能细胞因子，其在机体免疫调节、应激反应、造血干细胞分化和防御机制中起关键作用[17]。IL-6 能刺激活化淋巴 B 细胞分泌免疫球蛋白，这不仅可以促进胸腺细胞和淋巴 T 细胞增殖，还能诱导淋巴 T 细胞分泌白细胞介素－2（IL-2）[18]。TNF-α 是由巨噬细胞产生的一种自分泌型激活因子，不仅能刺激巨噬细胞、内皮细胞和上皮细胞等分泌 IL-2、白细胞介素－8（IL-8）和粒细胞巨噬细胞刺激因子（GM-CSF）等细胞因子，还能造成肿瘤细胞凋亡，促进血管生成、伤口愈合等。本试验结果表明，饲粮中添加纳米氧化锌能显著提高断奶仔猪血清 IL-6 和 TNF-α 含量，增强机体的免疫性能。荔霞等[19]研究表明，锌能显著提高正常小鼠血清中的 TNF-α 含量，且呈现剂量依赖关系；但随锌剂量的增加，IL-6 的水平受到抑制，这说明适当浓度的锌能促进动物机体的免疫功能，而高剂量则有可能降低其免疫力，导致机体功能紊乱。李方方等[20]研究表明，断奶仔猪饲粮中添加 1 800 mg/kg 包膜氧化锌能显著提高血清中 IL-6 的含量，增强机体的免疫力。

3.4　纳米氧化锌对断奶仔猪血清生化指标的影响

血清生化指标的变化在一定程度上反应了机体内组织细胞通透性和新陈代谢的变化。GPT 和 GOT 都是细胞内酶，在正常状况下由于细胞膜的屏障作用不易逸出，因此在血清中的活性较低，但当细胞因各种因素（如急性应激）而受损时，细胞膜的通透性升高使其释放进入血液的速度加快，GPT 和 GOT 的活性升高，表明动物机体健康受损。GPT 和 GOT 的活性还可以一定程度上反应肝功能健康状况，是肝细胞受损状况的重要指标。GPT 和 GOT 在动物氨基酸代谢中也占有重要地位，在正常生理范围内，血液中 GPT 和 GOT 的活性与猪的 ADG 呈现正相关的。从本研究结果中可知，饲粮中添加 450 mg/kg 纳米氧化锌能够提高血清中 GPT 的活性，其活性与朱宇旌等[21]研究报道的正常生理范围相近，这说明纳米氧化锌对断奶仔猪的肝功能没有损害作用。AKP 主要来自肝脏和骨骼中，它能促进骨骼的钙化，提高 Ca、P 等的沉积。锌是 AKP 合成所必需的金属离子，因而其活性易受动物体内锌含量的影响，所以 AKP 的活性可以反映体内锌的利用状况[22]。血清 UN 是反映动物体内蛋白质

代谢和饲粮氨基酸平衡状况的重要指标。血清 UN 含量降低表明氮在体内的沉积增加，饲粮中蛋白质的利用率提高；其含量升高表明体内蛋白质分解代谢增加，氮在机体内的沉积减少[22-23]。本研究发现饲粮中添加纳米氧化锌可以显著提高血清中 AKP 活性，显著降低血清 UN 含量，但对血清中 TP、TCHO、TG、HDL、GLU、Ca 和 P 含量没有显著影响。这说明新型纳米氧化锌能够提高饲粮中蛋白质的利用率，促进骨骼的钙化，进而促进断奶仔猪的生长。

4 结 论

① 纳米氧化锌能提高仔猪的生长性能，降低腹泻率，其中以 300 和 450 mg/kg 剂量组效果较佳，具体替代普通氧化锌的潜力。

② 纳米氧化锌可以提高血清中 IgA、IL-6 和 TNF-α 的含量，降低 UN 含量，提高饲粮中蛋白质的利用率。

参考文献：

[1] VALLEE B L,FALCHUK K H.The biochemical basis of zinc physiology[J].Physiological Reviews,1993,73(1):79–118.

[2] HAN X Y,MA Y F,LV M Y,et al.Chitosan-zinc chelate improves intestinal structure and mucosal function and decreases apoptosis in ileal mucosal epithelial cells in weaned pigs[J].British Journal of Nutrition,2014,111(8):1405–1411.

[3] 王敏奇,叶珊珊,杜勇杰,等.载铜纳米壳聚糖对断奶仔猪生长性能、免疫和抗氧化指标的影响[J].动物营养学报,2011,23(10):1806–1811.

[4] DAVIS M E,BROWN D C,MAXWELL C V,et al.Effect of phosphorylated mannans and pharmacological additions of zinc oxide on growth and immunocompetence of weanling pigs[J].Journal of Animal Science,2004,82(2):581–587.

[5] HEO J M,KIM J C,HANSEN C F,et al.Effects of dietary protein level and zinc oxide supplementation on the incidence of post-weaning diarrhoea in weaner pigs challenged with an enterotoxigenic strain of *Escherichia coli*[J].Livestock Science,2010,133(1/2/3):210–213.

[6] 计峰,罗绪刚,李素芬,等.高锌对断乳仔猪促生长作用及其机理的研究进展[J].动物营养学报,2003,15(3):1–5.

[7] POULSEN H D.Zinc and copper as feed additives,growth factors or unwanted environmental factors[J].Journal of Animal Science,1998,7(2):135–142.

[8] 王之盛,况应谷,任守国,等.纳米氧化锌对仔猪生产性能和粪便微生物群落的影响[J].中国畜牧杂志,2006,42(9):22–24.

[9] 马恒东,王之盛,周安国,等.翻转肠囊法研究仔猪小肠对纳米氧化锌的吸收[J].中国畜牧杂志,2005,41(9):25–26.

[10] 胡彩虹,游兆彤,朱康,等.纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能和肠黏膜屏障的影响[J].动物营养学报,2012,24(2):285–290.

[11] 方洛云,邹晓庭,蒋林树,等.不同锌源对断奶仔猪生长性能和消化酶的影响[J].中国饲料,2004(4):20–22.

[12] 冯占雨,李元晓,严文斌.日粮中添加不同水平的纳米氧化锌对断奶仔猪生产性能和健康状况的影响[J].饲料工业,2013,34(3):39–42.

[13] 喻兵权,张宏福,唐湘方,等.纳米氧化锌对断奶仔猪生长性能及腹泻率的影响[J].中国饲料,2008(1):18–21.

[14] 喻兵权,张宏福,陆伟,等.纳米氧化锌与普通氧化锌抑菌性能差异研究[J].饲料工业,2007,28(24):34–37.

[15] 方洛云,邹晓庭,蒋林树,等.不同锌源对断奶仔猪免疫和抗氧化作用的影响[J].中国兽医学报,2005,25(2):201–203.

[16] 刘军,周安国,王之盛.日粮锌与蛋白质水平对断奶仔猪前炎症细胞因子和肠道黏膜免疫分子的影响[J].中国畜牧杂志,2010,46(5):24–28.

[17] COMA J,ZIMMERMAN D R,CARRION D.Relationship of rate of lean tissue growth and other factors to concentration of urea in plasma of pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(12):3649–3656.

[18] HIRANO T,TAGA T,NAKANO N,et al.Purification to homogeneity and characterization of human B-cell differentiation factor (BCDF or BSFp-2)[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,1985,82(16):5490–5494.

[19] 荔霞,刘永明,齐志明,等.锌对小鼠血清中细胞因子水平的调控作用研究[J].家畜生态学报,2007,28(6):13–15.

[20] 李方方,苏航,张勇,等.饲粮添加复合抗菌肽与包被氧化锌对断奶仔猪生长性能及血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2015,27(9):2811–2819.

[21] 朱宇旌,苏欣,李方方,等.包被氧化锌对断奶仔猪生长性能、血清生化指标及营养物质表观消化率的影响[J].动物营养学报,2015,27(6):1779–1786.

[22] MALMOLF K.Amino acid in farm animal nutrition metabolism,partition and consequences of imbalance[J].Journal of Agriculture Research,1988,18(4):191–193.

[23] COMA J,CARRION D,ZIMMERMAN D R.Use of plasma urea nitrogen as a rapid response criterion to determine the lysine requirement of pigs[J].Journal of Animal Science,1995,73(2):472–481.

Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Growth Performance, Serum Immune and Biochemical Indices of Weaned Piglets

WANG Bin[1]　LIU Lujie[1]　ZHU Jia[1]　ZOU Junbiao[2]　LENG Dongbi[2]　WANG Minqi[1*]

(1. *College of Animal Science*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*; 2. *Jiangxi Innovating Science & Technology Co.*, *Ltd.*, *Nanchang* 330115, *China*)

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of different doses of dietary zinc oxide nanoparticles on growth performance, serum immune and biochemical indices of weaned piglets. A total of 150 28-day-old weaned piglets (Duroc × Landrace × Yorkshire) with an initial average body weight of (9.37±0.48) kg were randomly assigned into 5 groups with 3 replicates per group and 10 piglets per replicate. The piglets in the control group were fed a basal diet, in high zinc oxide group were fed the basal diet supplemented with 3 000 mg/kg common zinc oxide, and in three trial groups (group 1, 2 and 3) were fed the basal diet supplemented with 150, 300 and 450 mg/kg zinc oxide nanoparticles, respectively. The experiment lasted for 21 days. The results showed as follows: 1) compared with the control group, dietary supplementation of zinc oxide nanoparticles significantly increased the average daily feed intake and average daily gain (P<0.05), significantly decreased the ratio of feed to gain and diarrhea rate (P<0.05) of pigs, and the optimal supplemental levels of zinc oxide nanoparticles were 300 and 450 mg/kg which had the similar effects with common zinc oxide. 2) Compared with the control group, dietary zinc oxide nanoparticles significantly increased the contents of serum immunoglobulin A, interleukin-6 and tumor necrosis factor-α (P<0.05), and significantly reduced serum urea nitrogen content (P<0.05). These results suggest that dietary supplementation of 300 or 450 mg/kg zinc oxide nanoparticles has beneficial effects on immunity of weaned piglets, which also can increase their growth performance and decrease diarrhea rate. Accordingly, the new zinc oxide nanoparticles have a potential to substitute common zinc oxide.

Key words: zinc oxide nanoparticles; weaned piglets; growth performance; cytokines; immune indices; serum biochemical indices

---

*Corresponding author, professor, E-mail: wangmq@zju.edu.cn　　（责任编辑　田艳明）